Записки Ленинградского горного института им.Г.В.Плеханова.
Т. 125. Л., 1991

УДК 622.235

КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПО ОЦЕНКАМ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ

С.В.ШИРЕЛЬ

Одним из самых сложных вопросов использования расчетов полей напряжений для определения параметров буровзрывных работ (БВР) является выбор критерия (критериев) разрушения и их критериальных значений. Механика сплошных сред предоставляет целый набор возможных критериев. Из них наиболее широко во взрывном деле используются следующие [9,10,17]: теория наибольших нормальных напряжений; теория наибольших деформаций; теория наибольших касательных напряжений, энергетическая теория (формулы Бельтрами и Губера); теория Мора; формула Журкова, интеграл накапливаемости напряжений Бейли и т.д. [9,10,17]. Этот список, разумеется, не претендует на полноту, он охватывает лишь те критерии, которые чаще других применялись при расчетах взрывного разрушения. Однако даже указанные критерии во многих ситуациях вступают в противоречие друг с другом. Таким образом, в настоящее время довольно сложно на основании чисто физических предпосылок найти критерии разрушения и их критериальные значения

Поэтому, не претендуя на раскрытие закономерностей, лежащих в основе процессов разрушения и дробления горных пород взрывом, попробуем составить нужные нам критерии, исходя из следующих фактов, надежно установленных при технологических взрывах и многократно повторенных экспериментах [3-8,13, 15,16,18,19].

1. Объем разрушенной горной массы в одной и той же породе при неизменных (геометрически подобных) параметрах БВР пропорционален массе ВВ (формула Вобана).

2. Для однотипных ВВ имеет место расширенный закон геометрического подобия [8,16]:

$$\sigma_{max} = \frac{A}{\bar{r}^{k}}; \quad \tau_{+} = \alpha R_{з}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_{з}}, \qquad (1)$$

где σ_{max} – максимальное напряжение; $R_{з}$ – радиус заряда; r – текущая координата, расстояние от заряда; τ_{+} – длительность волны; A и α – константы, зависящие от свойств ВВ и породы.

3. При камуфлетном взрыве (в отсутствии свободных поверхностей) имеет

место зональное распределение степени разрушения материала [6,13,18]: $d_к \sim r^n$, где $d_к$ – средний размер куска разрушенной массы; $n \approx 2 \div 2{,}5$.

4. При постоянных (геометрически подобных) параметрах БВР в малотрещиноватой породе средний размер куска разрушенной массы в области технологических значений диаметра скважины (40–400 мм) растет с увеличением диаметра [4,8]: $d_к \sim d_{скв}^{p}$, где $p \approx 0{,}7 \div 1$.

5. Сведения о влиянии бризантности на дробление противоречивы. С одной стороны, значительный производственный опыт (относящийся более к породам малой и средней крепости) свидетельствует об улучшении дробления при применении малоплотных ВВ или зарядов с воздушными промежутками [15]. Другие, тоже многочисленные данные (и экспертные оценки производственников) говорят об улучшении дробления с повышением скорости детонации ВВ (чаще это относится к крепким породам) [3]. По-видимому, следует считать, что оба явления имеют место, хотя имеются данные и о независимости дробления от плотности и скорости детонации ВВ [19].

6. Опыт многорядного взрывания, а также эффект влияния результатов предшествующих взрывов показывает, что имеет место накопление разрушающего действия, хотя отнюдь не обязательно линейное [5].

Все изложенное доказывает трудность построения единого критерия разрушения и дробления, связанную, по-видимому, с наличием геометрического подобия (более четко выраженного для напряжений, весьма приближенного – для дробления) и отсутствием видимого энергетического подобия. Из формулы Чарльза [6]

$$W = A_0 \int_{D_1}^{d_к} \frac{dx}{x^m} \qquad (2)$$

(здесь W – энергия дробления; A_0 – энергоемкость разрушения; D_1 – начальный размер куска) вытекают три возможных закона дробления при различных m: Кирпичева – Кика, Бонда и Реттингера, а также Ребиндера, объединяющий первый и третий. С экспериментально установленными зависимостями $d_к$ от удельного расхода ВВ и среднего расстояния между макротрещинами лучше других сочетается закон Реттингера, поэтому во многих работах, например [14], именно он положен в основу эмпирических формул для выбора удельного расхода ВВ q. Однако при использовании законов Реттингера и Бонда для исключения неограниченного убывания доли энергии, идущей на дробление, с ростом масштаба требуется поставить в зависимость размер исходного элемента в нераздробленном массиве не только от диаметра скважины, но и от удельного расхода ВВ.

Рассмотрим закон Кирпичева – Кика:

$$W \sim V \lg \frac{D_1}{d_к} \sim D_2^3 \lg \frac{D_1}{d_к},$$

где V – объем области дробления; D_2 – ее линейный размер.

В качестве D_1 обычно при взрывном дроблении используют среднее расстояние между макротрещинами [6,7,14]. Рассмотрим простой пример (см. [13]). Пусть требуется раздробить объем породы V. В первом случае возьмем один заряд ВВ массой $Q=qV$ и диаметром $d_{з_1} \simeq \sqrt[3]{Q}$, во втором случае берем N_2 зарядов массой Q/N_2 и диаметром $d_{з_2} \simeq \sqrt[3]{Q/N_2}$. В первом случае размер среднего куска $d_{k_1} = \beta d_{з_1}^p$, во втором $d_{k_2} = \beta d_{з_2}^p = N_2^{1/3} d_{k_1}$ [x].

Таким образом, и при применении закона Кирпичева - Кика мы приходим к той же ситуации: при одинаковых затратах энергии имеет место различное дробление. Формально избавиться от этого неудобства можно, положив D_1 равным ЛНС для каждого отдельного заряда [12], однако это предполагает обязательное существование границ раздела между областями действия различных зарядов. Выход возможен, если отказаться от фиксированного значения среднего размера куска $d_{ср}$ (которое принято определять при натурных исследованиях трещиноватости) и, следуя В.Н.Родионову [13], представить распределение неоднородностей и трещин таким образом, чтобы тело оставалось подобным самому себе при любом изменении масштаба:

$$\frac{\ell^3 dn}{d \ln \ell} = \text{const},$$

где ℓ – размер неоднородности; n – число неоднородностей в единице объема.

Тогда D_1 определяется размерами неоднородностей, формирующих гранулометрический состав при взрыве заряда определенного диаметра. Роль величины, определяющей D_1, может играть время расширения полости или при неизменном типе ВВ – сам диаметр заряда (см. пп.1 и 2). Тогда минимальные размеры кусков будут зависеть от минимальных размеров неоднородностей, на которых имеют место существенные концентрации напряжений при данной скорости деформации, а максимальные размеры кусков на границе области разрушения – от размеров неоднородностей, для роста трещин между которыми достаточно времени воздействия взрывных волн. При наличии развитой системы макротрещин для формирования кусков по ней достаточно минимального времени воздействия и размеры максимальных кусков будут определяться лишь $d_{ср}$.

В случае малотрещиноватых пород размер области разрушения R_i зависит от скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ и времени воздействия τ_+, но следует учесть, что характеристики, связывающие R_i и поля напряжений, не должны зависеть от масштаба взрыва, иначе говоря от R_3 и $\dot{\varepsilon}$ (см. пп.1 и 2). Поэтому итоговой характеристикой может служить деформация $\varepsilon = \int_0^{\tau_+} \dot{\varepsilon}\, dt$ или с учетом закона Гука максимальные значения σ_1, $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$ и т.д. Возможно удобнее использовать ε, так как имеются данные о приближенном равенстве предельных значений деформации $[\varepsilon]$ для различных пород [2].

Однако полученное независимо от конкретной задачи критериальное значение может использоваться лишь для получения весьма приближенных оценок.

---

[x] Этот пример можно сделать корректнее в отношении влияния свободных поверхностей и взаимодействия волн, взяв в первом случае не один заряд, а N_1 зарядов ($1 \ll N_1 \ll N_2$).

В большинстве практических задач критериальные значения находят обратным путем при используемых параметрах БВР и затем применяют для прогнозирования результатов взрыва при измененных параметрах; возможно также просто сравнение значений критериальных характеристик для различных случаев вообще без использования пределов прочности. Критериальные характеристики типа σ или ε могут применяться для тех задач, где требуется найти границы областей разрушения. К ним в первую очередь относятся определение границ законтурного разрушения, оценка проработки подошвы, пересчет максимального расстояния между скважинами и максимального ЛНС при изменении конструкции заряда или расположения скважин.

Дробление породы в области разрушения определяется скоростями деформации и временем воздействия во всех точках. Следует отметить, что в отличие от границ области разрушения окончательный гранулометрический состав зависит от всей истории изменения поля напряжений. Накопление разрушений (см. п.6) возможно не только при воздействии взрывов нескольких зарядов, но и при перераспределении напряжений в процессе разрушения (например, образование мелких фракций на больших расстояниях от заряда в процессе сдвижения). Поэтому оценка дробления только по первичному полю напряжений является весьма приблизительной.

Обозначим характеристику поля напряжений, связанную с дроблением E. Из п.4 и отчасти п.5 следует, что качество дробления должно расти с увеличением $\dot{\varepsilon}$. Согласно п.5, 6 имеет место накопление разрушений, иными словами следует рассматривать интеграл по времени воздействия. Последним требованием (п.3) является приближение законов изменения E^{-1} и d_K для простейшего случая (сосредоточенного кумуфлетного заряда). Всем этим требованиям (расчеты производились по методике, изложенной в работе [I]) в достаточной мере удовлетворяет "энергоподобная" величина

$$E = \int \dot{\varepsilon}^{1+p} dt \approx \int \dot{\varepsilon}^2 dt = \int \dot{\varepsilon} d\varepsilon .$$

По-видимому, исходя из закона Кирпичева – Кика с изменяющимся начальным размером, эта величина как-то связана с долей энергии, идущей на дробление, и сходство формулы с формулой для расчета энергии не является случайным. Необходимо отметить, что выражение такого вида было предложено В.А.Падуковым [II] при допущении о существовании критической энтропии разрушения.

Разрушение может происходить при отрыве или сдвиге, поэтому можно принять, что

$$E_1 = \int_0^{\tau_B} \left(\sum_{i=1}^{3} \min^2(\dot{\varepsilon}_i, 0) + \sum_{i=1}^{3} \dot{\gamma}_i^2 \right) dt ; \qquad (3)$$

$$E_2 = \int_0^{\tau_B} \left(\frac{E_g}{[\sigma_p^\partial](1-2\mu)} \sum_{i=1}^{3} \min^2(\dot{\varepsilon}_i, 0) + \frac{G_g}{[\sigma_{сдв}^\partial]} \sum_{i=1}^{3} \dot{\gamma}_i^2 \right) dt , \qquad (4)$$

где $\tau_в$ – время воздействия волн; ε_i – главные нормальные деформации; γ_i – главные касательные деформации; μ – коэффициент Пуассона; $E_д$ и $G_д$ – динамические модули упругости; $[\sigma_р^д]$ и $[\sigma_{сдв}^д]$ – динамические пределы прочности.

В формуле (4) учтено различие пределов прочности на сдвиг и отрыв.

Полученная величина E характеризует качество дробления ($1/d_к$) в каждой точке. Нормировка производится сравнением фактического среднего куска и вычисленного среднего значения E по всему объему области разрушения (отбиваемого массива). Однако E характеризует лишь размер среднего куска, т.е., согласно [13], некоторую среднюю величину неоднородностей, которые активируются при данных скорости деформации и времени воздействия. Если имеются отклонения от "самоподобного" распределения неоднородностей, то они должны сказаться на распределении кусков. Например, если в сильнотрещиноватых породах отсутствуют куски размером более некоторого $d_{ср}$, то следует скорректировать распределение путем усечения. За основу для усечения можно взять логнормальное распределение или распределение Розина – Рамлера.

Отметим, что оба критерия (и разрушения, и дробления) не учитывают закономерности, отмеченной С.Н.Журковым. Причинами этого, вероятно, являются большой разброс данных о крупности дробления и размерах зон разрушения и узкий диапазон изменения скорости деформации при реальных параметрах БВР. Некоторое влияние скорости нагружения на прочность проявляется лишь в ближней зоне взрыва ($r < (5\text{–}10)\,r_з$), где расчет по формуле (4) дает меньшие размеры кусков, чем зафиксированные в экспериментах. Однако данная область составляет не более 3-5 % от общего объема блока и при расчетах может быть исключена без внесения существенных погрешностей. В дальнейшем предполагается в формуле (4) заменить значения прочностных характеристик на функции от $\dot{\varepsilon}$.

В качестве иллюстрации рассмотрим замену обычных промышленных ВВ на менее плотные и менее бризантные (хорошим примером которых являются игданиты, содержащие пенополистирол). В рамках наших представлений этот переход соответствует одновременному увеличению диаметра скважин и удельного расхода ВВ, точнее, связанной с ним величины $\sqrt{ab}/(\tau_+ c)$. При неизменном удельном расходе энергии ВВ Q/V, даже без учета существенного эффекта от повышения колонки заряда, такая замена оказывается полезной в слабых трещиноватых породах при наличии усечения распределения. Такие ВВ позволяют раздвинуть сетку скважин и повысить равномерность дробления за счет снижения переизмельчения. Для более крепких и менее трещиноватых пород применение менее бризантных ВВ не должно существенно изменить размеры области разрушения, более низкие напряжения в ближней зоне компенсируются более медленным затуханием. Это можно показать, отнеся расстояние от заряда не к его радиусу, а ко времени расширения полости $t_п$:

$$\bar{r} = \frac{(r - R_з)/c + t_п}{t_п}.$$

Однако в этом случае качество дробления существенно ухудшается за счет снижения скорости деформирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боровиков В.А., Вознягин И.Ф. Техника и технология взрывных работ / Ленинградский горный ин-т. Л., 1985.

2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978.

3. Данчев П.С. О зависимости эффекта дробления среды от коэффициента заряжания // Взрывное дело. 1960. № 50/7.

4. Дубынин Н.Г., Рябченко И.С. Отбойка руды зарядами скважин различного диаметра. Новосибирск: Наука, 1972.

5. Кук М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. М.: Недра, 1980.

6. Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела. Новосибирск: Наука, 1977.

7. Кутузов Б.Н. Взрывное и механическое разрушение горных пород. М.: Недра, 1973.

8. Мосинец В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. М.: Недра, 1976.

9. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Мир, 1969.

10. Никифоровский В.С., Шемякин Е.И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Недра, 1979.

11. Падуков В.А. Физико-технические основы открытой разработки месторождений / Ленинградский горный ин-т. М., 1987.

12. Падуков В.А., Макарьев В.П. Прогнозирование кусковатости горной массы при взрывных работах // Физические процессы горного производства: Межвуз. сборник. Вып. 2 / Ленинградский горный ин-т. Л., 1975.

13. Радионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. М.: Недра, 1986.

14. Репин Н.Я. Подготовка и экскавация вскрышных пород угольных разрезов. М.: Недра, 1978.

15. Теория и практика открытых разработок / Под ред. Н.В.Мельникова. М.: Недра, 1973.

16. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении горных пород взрывом. М.: Госгортехиздат, 1962.

17. Черепанов Г.П. Механика разрушения. М.: Наука, 1974.

18. Чертков В.Я. Модель осколкообразования при короткозамедленном взрывании серии удлиненных зарядов в трещиноватой породе // ФТПРПИ. 1986. № 6.

19. Юхансон К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ. М.: Мир, 1973.